

耐震性新鋼材を主筋に用いた R C部材の曲げ破壊性状に関する解析的研究

寺井雅和* 南 宏一*

Analytical Study of Flexural Behavior of RC Members with Earthquake-Resistant Steel Bars

Masakazu TERAJ* and Koichi MINAMI*

ABSTRACT

The influence which a few coefficients determine a mechanical performance of main bars do to earthquake energy consumption in formation of the plastic hinge of RC members was considered. Parametric analysis was performed in order to analyze what value should just give as coefficient of steel bar in order to control plastic modification proper. Moreover, multiple regression analysis was also performed. Especially, the analysis result was arranged paying attention to bar arrangement and the axial load ratio. On the basis of the results obtained in this study, the following conclusions may be drawn. 1) In order to enlarge both the ultimate flexural strength and the plastic behavior of RC members, the larger value of α and β is good. 2) In order to enlarge the amount of energy consumption, it is better that α is larger and β is smaller. 3) If the axial load becomes large, the influence of change by the coefficient will almost be lost.

キーワード：鉄筋コンクリート，耐震性新鋼材，曲げ変形性状

Keywords : Reinforce Concrete, Earthquake-Resistant Steel Bar, Flexural Behavior

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材に形成される塑性ヒンジによって、地震エネルギーを消費させることによって、RC構造の耐震安全性を確保しようとする考え方は、すでに一つの確立された耐震理論として定着している。しかしながら、その場合の塑性ヒンジの形成に関与する主筋の力学的性能は、いわゆる完全弾塑性形の復元力特性で表わされるもので、降伏後の主筋の伸び剛性はきわめて零に近い状態になり、地震エネルギーの消費に対しては、極めて大きい塑性変形を許容するものになる。したがって、このような設計法では、構造物に過大な塑性変形を与える事になり、建築物の性能設計という観点から考えると、必ずしも満足する結果を

与えるものにならない。

筆者らが所属する福山大学ハイテク・リサーチ・センターは平成10年度に設置され、新しい耐震性新鋼材の開発とその構造物への応用を主テーマに、土木・建築・機械系材料の三分野にわたって「大型構造物の耐震性向上」に関する開発研究を行ってきた。本研究は、当センター機械系材料の分野で開発されている耐震性新鋼材[1]をはじめ、一般鋼材とは異なる材料特性を有する鋼材がRC部材の主筋として用いられたとき、このRC部材がどのような性状を示すのか、解析的・実験的に検討するものである。RC部材の耐震性に関する一般的性状として、主筋として使われている鋼材の力学的性能を規定する諸数値が、RC部材の塑性ヒンジの形成における地震エネルギー消費に対してどのよ

*建築学科

うな関わりを持つのか、また、適正に塑性変形を制御するためには、鋼材の諸数値としてどのような値を与えればよいのかを検証する。本論は、この研究の一環として、主筋に用いられた鋼材の応力-ひずみ(以下 $\sigma-\varepsilon$)関係において、係数 α, β, γ の数値によってRC部材の特性がどのように変化するのか解析的に検討する。

2. 鉄筋コンクリート部材の断面解析法

2. 1 鋼材の $\sigma-\varepsilon$ 関係における α, β, γ 効果

鉄筋の $\sigma-\varepsilon$ 関係をモデル化するにあたって、様々な特性を持つ鋼材を想定して、本解析では α, β, γ の3つの係数で形状を変化させたトリリニアモデルを用いる。鉄筋降伏後のヤング係数に α 、鉄筋の降伏応力度に β と γ を係数とした場合、鉄筋の強度はそれぞれ、降伏前では式(1)、降伏後では式(2)、そして最大強度は式(3)で表わすことができる(図-1上)。

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad (0 \leq \varepsilon_s \leq \beta \varepsilon_y) \quad (1)$$

$$\sigma_s = \alpha E_s \varepsilon_s + \beta \sigma_y (1 - \alpha) \quad (\beta \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_u) \quad (2)$$

$$\sigma_s = \gamma \sigma_y \quad (\varepsilon_u \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_B) \quad (3)$$

ここに、 $E_s, \varepsilon_s, \sigma_y$ はそれぞれ鉄筋のヤング係数、鉄筋のひずみ、鉄筋の降伏応力度である。コンクリート構成則は、図-1下に示すモデルを用いた。

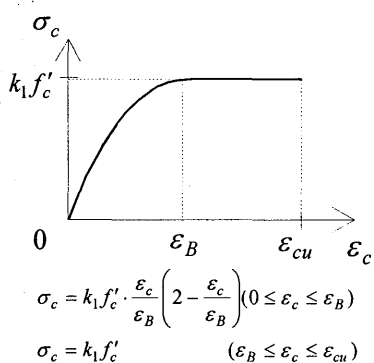
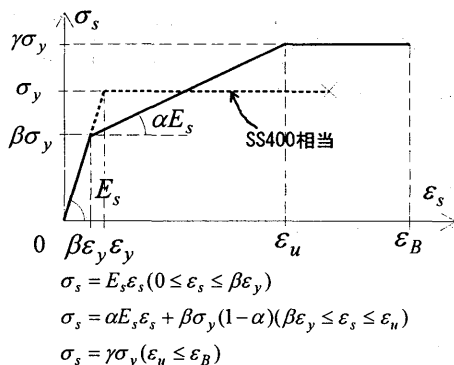


図-1 コンクリートと鉄筋の $\sigma-\varepsilon$ 関係

表-1 解析因子

変数	材 質 係 数	α	0.05	0.1	0.3		
		β	0.6	0.8	1.0		
		γ	1.2	1.4	1.6		
	軸力比		0.0	0.1	0.3	0.6	
	配筋		シングル配筋、ダブル配筋				
引張補強筋比	pt(%)	0.33	0.48	0.85	1.30	1.99	5.30

表-2 材料特性

コンクリート		鉄筋	
σ_B	30.0N/mm ²	σ_y	400N/mm ²
ε_B	0.0020	ε_y	0.0020
ε_{cu}	0.0035	ε_u	γ による
		ε_B	0.3500

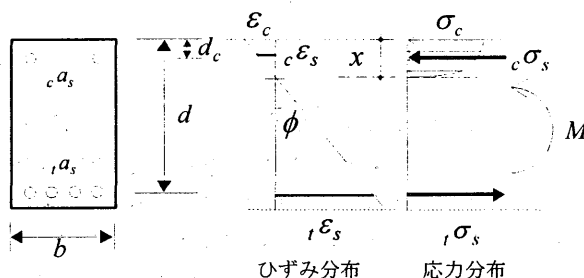


図-2 RCばりの応力度とひずみ度の分布

2. 2 RCはり部材の解析

RC部材の単調載荷時の曲げ変形性能に及ぼす主筋の α, β, γ の諸数値の影響を検証するため、 α, β, γ を主変数とする27組のパラメトリック解析を行った。表-1に解析因子を示すように、配筋についても変数としたが、複筋ばりは後述の正負交番載荷を行った実験との比較を行うため、上端筋と下端筋には同じ主筋量とした。また、曲げを受ける部材の破壊は、引張鉄筋量と密接な関係があるため、引張鉄筋量についてもパラメータとして検討した。鉄筋量により部材の破壊パターンが変化するが、その境界値となるのが最小鉄筋比 p_{min} と最大鉄筋比 p_{max} である。最小鉄筋比は、日本建築学会のRC計算規準では0.4%、土木学会標準示方書では0.2%と定められている。最大鉄筋比は、土木の示方書では釣合い鉄筋比 p_b の75%以下の引張側鉄筋比となるように定められている。本解析で対象としている部材断面(150mm×200mm)と、表-2に示す材料を用いた場合、釣合い鉄筋比は約3.3%となる(ただし、実際の p_b 値はパラメータ β や γ によって変動する)ので、今回の解析では最大鉄筋比を2.4%と考える。表-1における p_t のうち、0.48%~1.99%までが実際の設計でも用いられる範囲の鉄筋量となり、0.33%は無筋部材に等しい貧補強を、5.3%は釣合い鉄筋比を過剰に超えた補強をした部材を想定したものである。

図-2に示すようなRCはり部材の断面に対して平

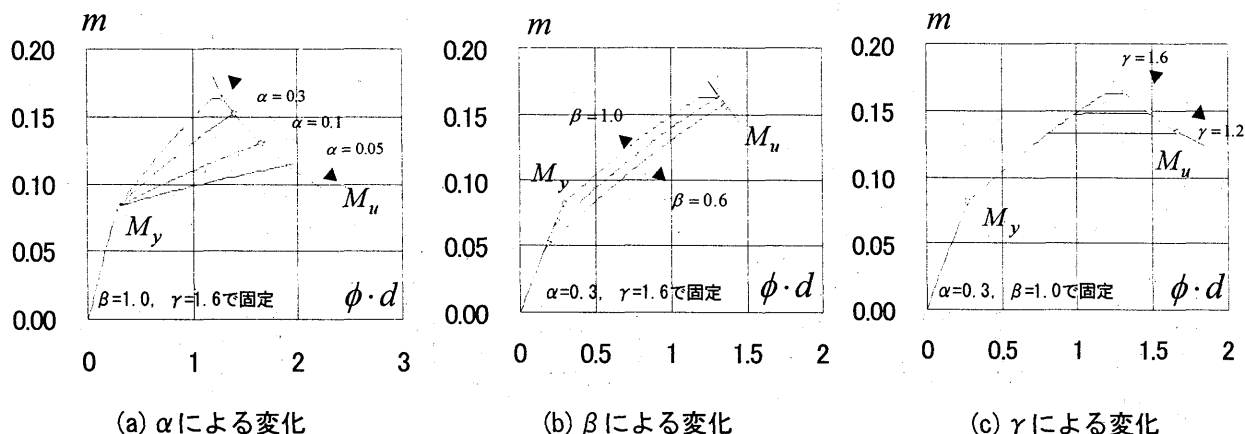


図-3 α, β, γ による $M-\phi$ 関係の変化 (引張主筋量 $p_t=0.85\%$ の単筋ばり場合)

面保持の仮定を適用することで、曲げモーメント-曲率(以下、 $M-\phi$)関係を計算する。ここで想定しているRC部材の断面は、過去に当センターで行われた実験[2]に対応させるため、断面寸法 $b \times D = 150 \times 200$ である。また、材料諸元は表-2に示す値とした。コンクリートおよび鉄筋の応力とひずみ、軸方向の釣合条件、曲げモーメントは、次式のとおり表わすことができる。

$$\text{コンクリートのひずみ: } \varepsilon_c(x) = \phi \cdot x \cdots \cdots (4)$$

$$\text{コンクリートの応力: } \sigma_c(x) = f(\varepsilon_c(x)) \cdots \cdots (5)$$

$$\text{引張鉄筋のひずみ: } \varepsilon_s = \phi \cdot (d - x) \cdots \cdots (6)$$

$$\text{引張鉄筋の応力: } \sigma_s = g(\varepsilon_s) \cdots \cdots (7)$$

$$\text{圧縮鉄筋のひずみ: } \varepsilon_{cs} = \phi \cdot (x - d_c) \cdots \cdots (8)$$

$$\text{圧縮鉄筋の応力: } \sigma_{cs} = g_c(\varepsilon_{cs}) \cdots \cdots (9)$$

軸方向力:

$$N = \int \sigma_c(x) b dx - i_a \sigma_s + c_a \sigma_{cs} \cdots \cdots (10)$$

曲げモーメント:

$$M = \int \sigma_c(x) b x dx + i_a \sigma_s (d - x) + c_a \sigma_{cs} (x - d_c) \cdots \cdots (11)$$

ここに、 f はコンクリートの $\sigma-\varepsilon$ 関係、 g は鉄筋の $\sigma-\varepsilon$ 関係。

数値計算では、曲率 ϕ を与え、それに対して支配方程式を満たす曲げモーメント M を求める。ある ϕ に対して M を計算するに当たり中立軸位置 x を仮定し、その x を用いて計算した軸方向力が外力となる軸力を満足するなら仮定した x は正解ということになり、満足しないなら不正解なので、新たな x を仮定しなおして同じ計算を繰り返す。すなわち、 x の正解を求めるために繰り返し計算によって、数値的に解を求める非線形求解法を行う。本研究では、ニュートン・ラプソン法を利用してこの収束計算を行った。

2. 3 計算結果

パラメータが多く全ての計算結果を示すことは煩

雑なので、 $p_t=1.99\%$ の単筋ばりで、 α, β, γ の主変数のうち2つを固定した場合の結果の例を図-3に示す。同図において、縦軸の曲げモーメントは $m = M/bd^2\sigma_B$ 、横軸の曲率は $\phi \cdot d$ にそれぞれ無次元化してある。なお、同図中には、引張主筋が降伏する点(M_y)と、圧縮側コンクリートが圧潰する点(M_u)を○で示してある。この図からわかるように、 α, β, γ のすべての変数において、値が大きくなると曲げモーメントは大きくなり、終局時の変形は小さくなることがわかる。これらの性状は、鉄筋やコンクリートの材料定数が変わっても同じ傾向であった。

α, β, γ のパラメータの組み合わせは 27 通りあるので、1 つのパラメータに着目して整理した結果を、単筋ばりの場合を図-4に、複筋ばりの場合を図-5に示す。図-4, 5は、縦軸に部材性能を表す終局曲げ耐力の無次元量 $m_u (= M_u/bd^2\sigma_B)$ 、塑性変形量の無次元量 $\phi_u \cdot d$ 、消費エネルギーの無次元量 $E (= U/bd\sigma_B)$ をそれぞれとり、横軸を引張主筋量 p_t としている。各データは、図中に示す係数で固定したときの値でプロットしている。

図-4による単筋ばりでは、 p_t が大きいほど m_u は大きく、 $\phi_u \cdot d$ は小さく、 E は小さくなる傾向がみられる。そして、 α が大きいほど m_u と E は大きく、 $\phi_u \cdot d$ は小さくなるため、RC部材の性能は高くなることがわかる。 β も α と同じ傾向があるが、消費エネルギーについては α の場合と逆に、 β が小さい方が高い値を示している。 γ については値による違いがほとんど見られなかったが、これは単筋ばりの場合、コンクリートの圧縮破壊で耐力が決まり、引張主筋が γ で規定される最大強度に到達する前にはりが破壊するためである。以上のことを言い換えると、次のとおりである。

- ・終局曲げ耐力を大きくするためには、 α と β は大きい方がよい。
- ・塑性変形量を小さく抑えるためには、 α と β は大

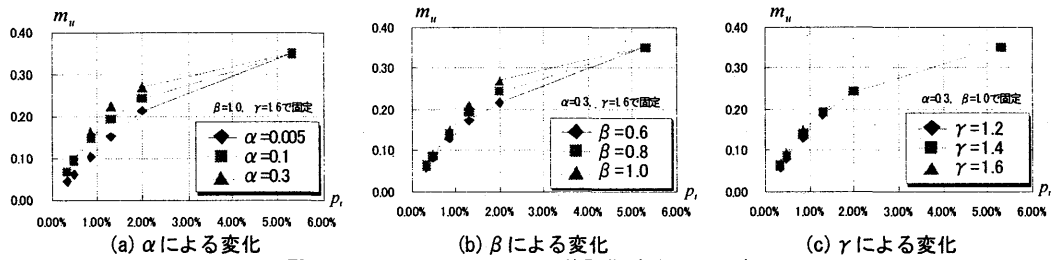


図-4-1 α, β, γ による終局曲げ耐力 m_u の変化

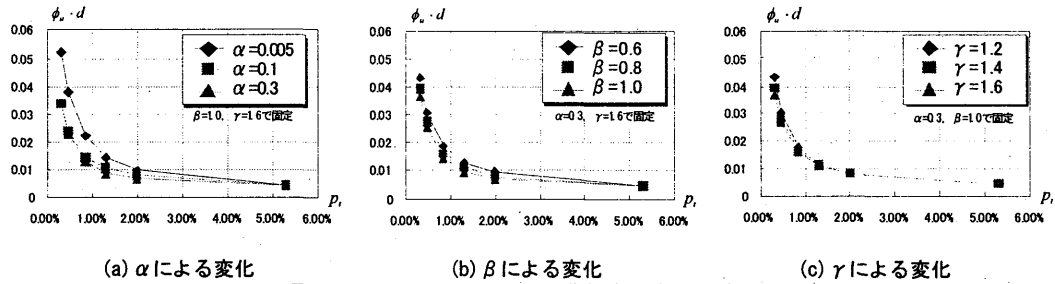


図-4-2 α, β, γ による塑性変形量 ϕ_u の変化

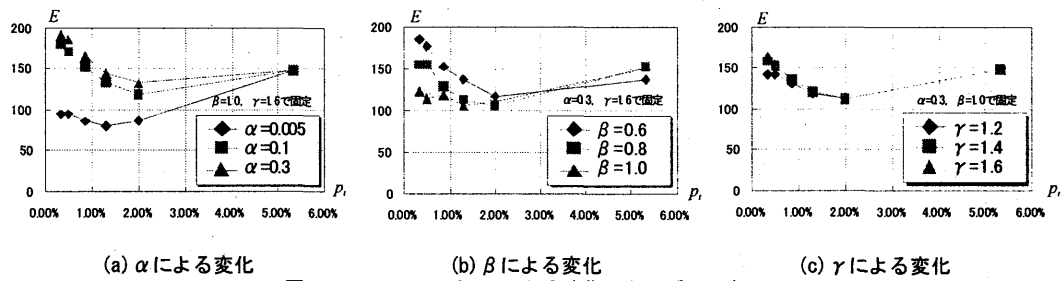


図-4-3 α, β, γ による消費エネルギーEの変化

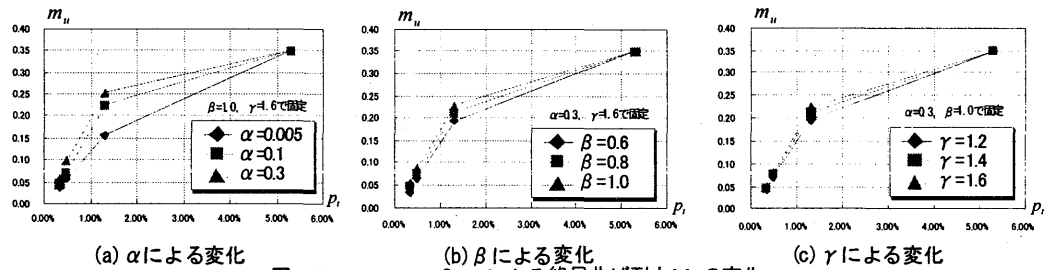


図-5-1 α, β, γ による終局曲げ耐力 m_u の変化

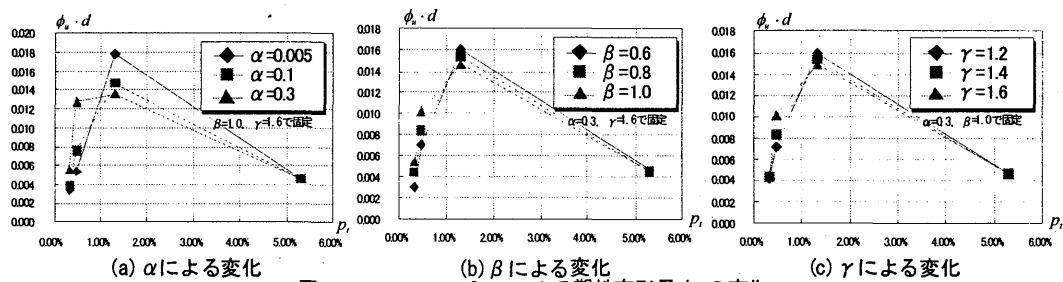


図-5-2 α, β, γ による塑性変形量 ϕ_u の変化

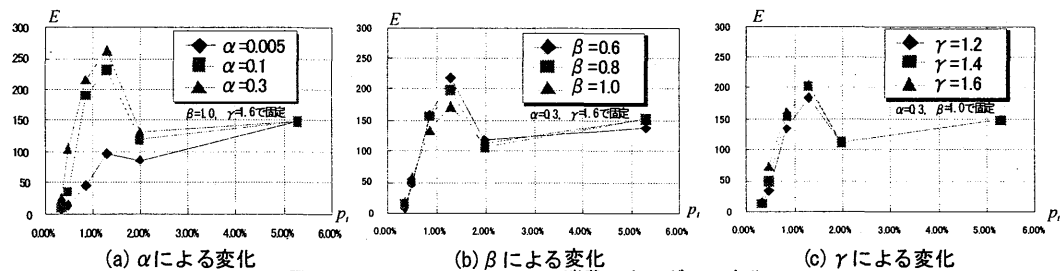
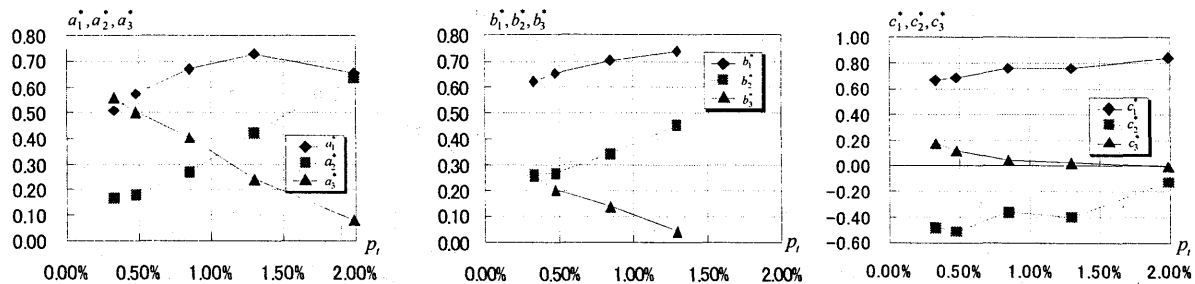


図-5-3 α, β, γ による消費エネルギーEの変化



(a) 終局曲げ耐力 m (b) 塑性変形量 $\phi_u \cdot d$ (c) 消費エネルギー量 E

図-6 α, β, γ 値の標準回帰係数と補強筋比の関係 (単筋ばりの場合)

きい方がよい。

- ・エネルギー消費量を大きくするためには、 α は大きく、 β は小さい方がよい。

図-5は複筋比 $c_a s_f / a_s = 1.0$ の複筋ばりの場合であるが、単筋ばりの場合と同様、 α, β, γ 値は大きいほうが終局曲げ耐力については大きくなる。しかし、塑性変形量 $\phi_u \cdot d$ とエネルギー消費量 E はおよそ $p_t = 1.0\%$ 程度で最大となるような傾向を示していることが単筋ばりと異なる点である。

3. 部材性能評価

3. 1 パラメータ α, β, γ が部材性能に及ぼす影響

α, β, γ の諸値が RC 部材の曲げ変形性能にどのように影響を及ぼすか、その傾向を調べるために解析結果を整理して検討する。膨大な計算結果の数値から最も部材性能に適したパラメータの組み合わせを見つけることは煩雑となり困難である。ここでは、統計的な処理を行い、部材性能の指標となる「終局曲げ耐力 m 」、「最大変形 $\phi_u \cdot d$ 」「エネルギー消費量 E 」に及ぼす α, β, γ の程度を分析した。

統計処理の方法として、重回帰分析を行う。 α, β, γ の複数の変量(説明変量)から、部材の構造性能を表す $m, \phi_u \cdot d, E$ (目的変量)を、一次式で予測するのが重回帰分析である。このような統計処理を行うと式(12)~(14)のような一次式が作られ、目標変量の予測や制御をすることができる。

$$m = a_1 \alpha + a_2 \beta + a_3 \gamma + a_4 \quad (12)$$

$$\phi_u \cdot d = b_1 \alpha + b_2 \beta + b_3 \gamma + b_4 \quad (13)$$

$$E = c_1 \alpha + c_2 \beta + c_3 \gamma + c_4 \quad (14)$$

ここで、 $a_{1\sim3}, b_{1\sim3}, c_{1\sim3}$ は回帰係数と呼ばれ、この値が高いほど各説明変量の目的変量への寄与が高いことを表している。

説明変量 α, β, γ は変動幅が異なるため、このままの回帰係数から、説明変量の影響の大きさを単純に比較・評価することはできない。そこで、説明変量の大きさに左右されないために、『データの標準化』という処理を行い、回帰係数を 0.0~1.0 の範囲で表した。横

軸に引張主筋量 p_t を、縦軸に標準化されたデータの回帰係数(標準回帰係数 $a_{1\sim3}^*, b_{1\sim3}^*, c_{1\sim3}^*$)をとったグラフを図-6に示す。

標準回帰係数の絶対値が1に近いほうが、説明変量への依存度が大きいことを表している。目的変量 $m, \phi_u \cdot d, E$ の全てにおいて、 a_1^*, b_1^*, c_1^* の係数値は高く、引張主筋量にかかわらず α の依存が高い。すなわち、 α が大きいほうが曲げ耐力が高く、消費エネルギー量が大きくなり、塑性変形は小さく抑えることができるが、これは2.3で確認したことと同じである。また、 β は引張補主筋量が大きくなるにしたがって目的変量 $m, \phi_u \cdot d$ への依存度が大きくなる傾向を示すが、消費エネルギーへの依存はあまり大きくない。 γ は β とは逆の傾向があるが、引張主筋が適度に入った RC 部材においては、部材性能への影響はあまり大きくない。これは、2.3でも述べたように、主筋が γ 値で決まる第3勾配へ入る前に、圧縮側コンクリートが破壊してしまうためである。

図-6(c)で、 c_2^* の係数が負になっているが、これは説明変量 E に対する影響が c_1^*, c_3^* に対して反対の性質を持っているということを表している。すなわち、 α が大きいほうが消費エネルギーは大きくなるが、 β は小さいほうが消費エネルギーは大きくなるということで、これも2.3で確認した通りである。しかし、依存の度合いは係数の絶対値で表されるので、引張補強筋量が多くなるにつれて、 β の依存度は小さくなる。

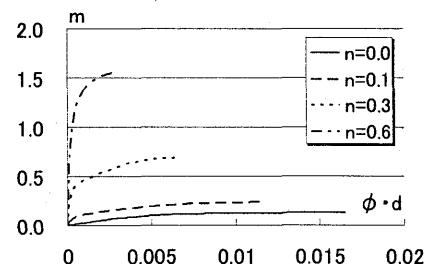


図-7 軸力比による比較
($\alpha=0.3, \beta=1.0, \gamma=1.4, p_t=0.85\%$)

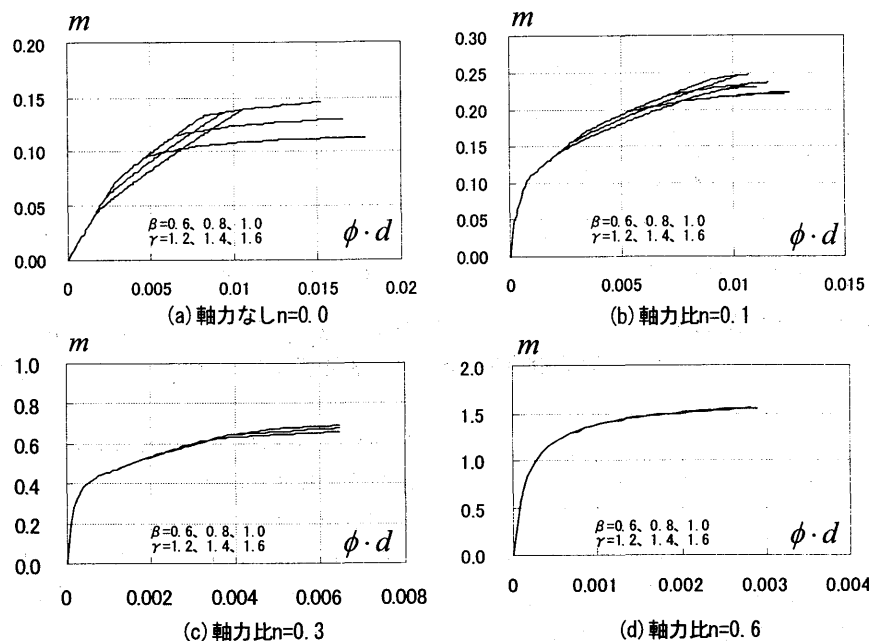


図-8 軸力比をパラメータとした計算結果 ($\alpha=0.3$ の場合)

3. 2 軸力の影響

はじめに、軸力の影響を比較するために、 $\alpha=0.3$ 、 $\beta=1.0$ 、 $\gamma=1.4$ 、 $p_t=0.85\%$ とした場合の $M-\phi$ 関係を図-7に示す。軸力の増大とともに曲げ耐力は高くなるが、変形能力は小さくなっていくことがわかる。

次に、柱断面に対する軸力比 $n (=N/bd\sigma_B)$ を 0.0, 0.1, 0.3, 0.6 と変化させた計算結果を、図-8に示す。ここでの計算はこれまでの解析と同様、断面寸法は $150\text{mm} \times 200\text{mm}$ とし、配筋は断面内に D13 を 4 本ダブル配筋 (片側 2 本ずつ) したものを想定している。また、パラメータが多く煩雑になるので、 $\alpha=0.3$ で固定し、 β, γ を表-1 の通り変化させた 9 通りの結果を一つの図にまとめて描いた。

軸力比がない場合 (図-8 (a))、RC 部材の $M-\phi$ 関係は、鋼材のトリリニア型の復元力特性がそのまま現れている。軸力が大きくなるにつれて、鉄筋が降伏する前にコンクリートのひずみで破壊が決まっているので、 α, β, γ 値による変化の影響がほとんどなくなっていくことがわかる。

4. まとめ

主筋として使われている鋼材の力学的性能を規定する諸数値が、RC 部材の塑性ヒンジの形成における地震エネルギー消費に対してどのような関わりを持つのか、さらに適正に塑性変形を制御するためには、鋼材の諸数値としてどのような値を与えればよいのかを、 α, β, γ についてパラメトリックな解析を行い、さらに α, β, γ のもつ意味を調べるために重回帰分析を行っ

た。また、配筋量と軸力比に絞って解析結果を整理・検討した。その結果、以下のことが確認できた。

- ・ 終局曲げ耐力を大きくするためには、 α と β は大きい方がよい。
- ・ 塑性変形量を小さく抑えるためには、 α と β は大きい方がよい。
- ・ エネルギー消費量を大きくするためには、 α は大きく、 β は小さい方がよい。
- ・ 軸力が大きくなると、 α, β, γ 値による変化の影響がほとんどなくなる。

最後のまとめから、柱材に耐震性新鋼材を用いるよりも、塑性化するより材に耐震性新鋼材を適用する方が最も効果的であると言える。

謝辞

本研究は、平成 11～15 年度私立大学学術研究高度化推進事業 (ハイテク・リサーチ・センター事業) の援助のもとで行われた。

参考文献

- [1] 吉村博文ほか:耐震性 Ni-Cr 系オーステナイト鋼の開発, 日本材料学会, 第 52 期学術講演会, pp. 212-213, 2003. 5
- [2] 寺井雅和, 南 宏一:鉄筋コンクリート部材の曲げ変形性能に及ぼす主筋の力学的性状の影響, 第一回性能規定型耐震設計に関する研究発表会講演論文集, pp. 149-154, 2004. 5